

学位論文題名

Distribution of Mountain Permafrost
in the Daisetsu Mountains, Hokkaido, northern Japan

(北海道大雪山における山岳永久凍土分布)

学位論文内容の要旨

地球上の全陸地のうち約 25%には永久凍土が分布する。その大部分はシベリア・アラスカ・カナダなどの北極を中心とする高緯度地域に極域永久凍土として分布している。一方、季節凍土帯である中低緯度地域には永久凍土は高山帯においてのみ、山岳永久凍土として分布している。山岳永久凍土は、一般に温暖永久凍土であることから、気候変化に対しその分布範囲の変化として敏感に反応することが予想されている。しかし、山岳地域特有の起伏に富んだ地形に起因する放射分布や積雪分布の不均一性などから、その分布状況は複雑である。

日本の高山帯では、これまでに富士山と北海道大雪山の山頂部において、山岳永久凍土の存在が確認されている。このうち大雪山については、山頂部の気温観測結果や指標地形とされるパルサの存在などから、永久凍土の下限高度が論じられている。また、ボア・ホールを用いた通年地温観測が行われ、永久凍土の熱的性質が詳しく調べられている。しかし、永久凍土の分布については、風衝地での限られたデータに基づいて議論されているに過ぎず、その詳細は明らかになっていない。本研究の目的は、①北海道大雪山の山岳永久凍土の分布および分布特性を、野外観測により明らかにすること、②分布モデルを構築し、あわせて温暖化に伴う山岳永久凍土分布域の変化について論じることである。

本論文は、以下の7章で構成されている。

第1章では極域永久凍土とは異なる山岳永久凍土の分布特性及び地球規模の気候変動に対する意義を述べる。さらに、欧州アルプスを中心に行われてきたこれまでの研究成果を総括するとともに、日本の山岳永久凍土研究の現状について述べる。これらのことを踏まえて、本研究の目的および本論文の構成を述べる。第2章では、本研究が対象とする北海道大雪山について、地形・気象・植生分布などの地域概要について記述する。

第3章では、本研究で適用される野外調査手法について述べる。永久凍土の存在を明らかにする最も確実な手法は深層ボーリングとボア・ホールを用いた通年にわたる地温観測である。本研究では、これら直接的手法に変わり、簡便なくつかの間接的手法を組み合わせることにより広域的また局所的な野外観測を実施した。ヨーロッパ山岳地域において永久凍土の分布を調べるために一般的に用いられている積雪底地表面温度（BTS）測定、

および地球物理学的手法のひとつである比抵抗電気探査について述べる。本研究では、これら従来の永久凍土探査手法を改良し、BTS 値の時系列変動観測 (BTS モニタリング) や、地下構造の二次元的な把握を可能とする比抵抗映像法を新たに導入した。

第4章では従来明らかにされてこなかった大雪山における積雪下での永久凍土の分布について議論する。異なる表層地質・地形条件下の多地点において BTS の冬季間を通じたモニタリングを行い、3つの異なる BTS の年変動パターンを見出した。そのうち、 -3°C 以下の低い BTS 値が観測された地点では、垂直電気探査によって永久凍土の存在が示された。以上の結果から、積雪底でも永久凍土が存在するのは、① 積雪前に冷却される、② 積雪下でも冬季間を通じて外気温の直接的な影響を受ける、③ 岩塊斜面中の移流効果により冷気の集積が生じるところ、であることを指摘した。また、従来の BTS マッピングに BTS モニタリングを併せることによりこれらの永久凍土形成メカニズムを考慮したうえで、永久凍土のマッピングが可能であることを示した。

第5章では通年にわたってほとんど積雪がない風衝地およびその周辺での永久凍土の面的分布・構造について野外観測結果から議論する。積雪分布を反映する植生分布を詳細に記載し、比抵抗映像法から得られる比抵抗断面と対比し、積雪分布と永久凍土分布・構造の関連を明らかにした。その結果、永久凍土は風衝地性矮性低木群落分布域には分布するが、雪田性群落分布域には存在しないこと、南向きの風衝斜面では活動層が厚いこと、風衝岩塊斜面ではトラップされた積雪の断熱効果のため永久凍土の発達は風衝地ほどではないことなど、大雪山山頂部における永久凍土分布特性が明らかになった。また、比抵抗映像法によって示された比抵抗値の分布と地温分布はよく対応し、永久凍土の二次元的な分布・構造をこれまでにない精度で明らかにできることを示した。

これら野外観測によって得られた永久凍土分布に関する情報を基に、第6章では地理情報学的手法による山岳永久凍土の分布モデルを構築する。比抵抗映像法で明らかにされた 10 m 程度の誤差範囲内での分布モデルを実現するために、 2×2 m グリッドスケールの精密 DEM を作成し解析に供した。このような微小スケールではヨーロッパ山岳地域において永久凍土の分布を示す指標とされている日射量分布は第一義的ではないことが示された。日射量分布に代わる永久凍土の分布指標として地表面における積算凍結・融解指数 (CFTI) を導入した。気温と地表面温度の違いを生じさせる積雪の断熱効果は、積雪深と積雪相の通年変化としてモデルに組み込んだ。積雪分布は卓越風向・微地形を考慮してシミュレートした。CFTI が負の値を示すところに永久凍土の分布が予想される。作成された永久凍土分布図の妥当性は第5章で示された比抵抗映像法や浅層部地温観測結果によって確認された。この永久凍土分布図に基づき、最近の GCM(Global Circulation Model)による気温変化予想に対する大雪山山頂部の永久凍土分布域の変化をシミュレートした。その結果、現在より約 2.7°C の年平均気温上昇が予想されている 2080 年代には永久凍土分布域が現在の 30%程度にまで減少することを示した。

第7章では本研究で得られた成果をまとめ、結論を述べる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 平 川 一 臣
副 査 教 授 小 野 有 五
副 査 教 授 福 田 正 己
副 査 助 教 授 松 岡 憲 知 (筑波大学地球科学系)
副 査 助 教 授 渡 邊 悌 二

学 位 論 文 題 名

Distribution of Mountain Permafrost in the Daisetsu Mountains, Hokkaido, northern Japan

(北海道大雪山における山岳永久凍土分布)

中・低緯度地域の季節凍土帯では永久凍土は高山帯においてのみ山岳永久凍土として分布している。山岳永久凍土は一般に温暖永久凍土であることから、気候変化に対し、その分布域の変化として敏感に反応することが予想されている。しかし、山岳地域特有の起伏に富んだ地形に起因する放射分布や積雪分布などの不均一性から、その分布状況は複雑である。日本では北海道大雪山において、地温や気温観測ならびに指標地形であるパルサの存在から、山岳永久凍土の発達を示されている。しかし、永久凍土の分布については、風衝地における限られたデータに基づいて議論されているに過ぎず、その詳細は明らかになっていない。本研究の目的は、① 大雪山における山岳永久凍土の分布および分布特性を、野外観測により明らかにすること、② 分布モデルを構築し、あわせて温暖化に伴う山岳永久凍土分布域の変化について論ずることである。

野外における永久凍土探査は、比抵抗電気探査や浅層地温観測および積雪底地表面温度 (BTS) 観測などを組み合わせることにより行われた。多地点での BTS モニタリング結果から、積雪底における3つの地表面冷却作用の様式が見出され、いずれの地点でも垂直電気探査によって永久凍土の存在が示された。これらの結果から、積雪底でも永久凍土が存在するのは、① 積雪前に冷却され、② 積雪下でも冬季間を通じて外気温の直接的な影響を受け、そして③ 岩塊斜面中の空気対流効果のため冷気が集積するところであることが指摘された。また、これらの形成メカニズムを考慮したうえで、永久凍土のマッピングが可能であることが示された。

水平成層地下構造を仮定した垂直電気探査法に加え、二次元的な地下構造を把握できる比抵抗映像法が山岳永久凍土探査に新たに導入された。積雪分布を反映する植生群落を詳

細に記載し、比抵抗映像法から得られる比抵抗断面と対比し、積雪分布と永久凍土分布・構造の関連が明らかにされた。すなわち、永久凍土は風衝地性矮性低木群落分布域には分布するが、雪田性群落分布域には存在しないこと、南向きの風衝斜面では活動層が厚いことなど、大雪山山頂部における永久凍土分布特性が明らかになった。また比抵抗映像法によって示された比抵抗値の分布と地温分布はよく対応し、永久凍土の二次元的な分布・構造をこれまでにない精度で明らかにできることが示された。

これら野外観測によってもたらされた永久凍土分布に関する情報を基礎に、地理情報学的手法 (GIS) による分布モデルが構築された。永久凍土の分布指標として地表面積算凍結・融解指数 (CFTI) 分布を導入し、CFTI が負の値を示すところが永久凍土の分布域であると仮定された。2 x 2 m グリッドスケールの精密 DEM によって微地形を再現し、卓越風向を考慮して積雪分布がシミュレートされた。積雪の断熱効果は積雪深と積雪相の通年変化としてモデルに組み込まれている。作成された永久凍土分布図の妥当性については比抵抗映像法や浅層部地温観測結果によって確認された。この永久凍土分布図に基づき、最近の GCM (Global Circulation Model) による気温変化予想に対する大雪山山頂部の永久凍土分布域の変化がシミュレートされた。その結果、現在より約 2.7 度の年平均気温上昇が予想されている 2080 年代には永久凍土分布域が現在の 30% 程度にまで減少することが示された。

この研究は、第一に永久凍土の形成プロセスも含めた探査を可能にする BTS モニタリングや詳細な永久凍土構造を明らかにする比抵抗映像法など、野外観測における方法論的な進歩をもたらしたこと、第二に永久凍土の発達に寄与する積雪の効果を実証的かつ具体的に示したこと、第三に地理情報学的手法により、これまでにない高精度な分布モデルを構築し、地球的規模の気候変動に対する山岳永久凍土の意義をその分布域の変化にまで論及したこと、以上三点においてきわめて重要な成果をもたらした。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ、申請者が研究者として誠実かつ熱心であり、博士 (地球環境科学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと判定した。